

## 탄성거동에 의한 유체력을 고려한 초대형 부유식 구조물의 유탄성응답 해석

김철현\* · 구자삼\* · 이창호\*\* · 이승철\*

\*부경대학교 조선해양시스템공학과

\*\*동명대학교 조선공학과

### Hydroelastic Response Analysis of Very Large Floating Structures Including the Hydrodynamic Forces due to Elastic Motions in Waves

CHUEL-HYUN KIM\*, JA-SAM GOO\*\*, CHANG-HO LEE\*\* AND SEUNG-CHUL LEE\*

\*Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, PuKyong National University, Busan, Korea

\*\*Department of Naval Architecture, Tongmyong University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Very large floating structure 초대형부유식 구조물, Hydroelastic response 유탄성 응답, Three dimensional source distribution method 3차원 특이점 분포법, Elastic motion 탄성거동

**ABSTRACT:** Recently, with the increase in requirements for marine development, a marine urbanism is being visualized, with more and more huge-scale structures at the scope of the ocean space utilization. In particular, a pontoon-type structure has attracted attention, since The Floating Structures Association of Japan proposed a new concept as the most suitable one of floating airports. The Very Large Floating Structure (VLFS) is considered a flexible structure, for a quite large length-to-breadth ratio and its geometrical flexibility. The main objective of this study is to make an exact and convenient prediction about the hydro-elastic response on very large offshore structures in waves. The numerical approach for the hydro-elastic responses is based on the combination of the three dimensional source distribution method and the dynamic response analysis method, which assumed a dividing pontoon type structure, as many rigid bodies connected elastic beam elements. The established hydro-elastic theory was applied to the radiation forces caused by motions of a whole structure, formulated using the global coordinate system, which has the origin at the center of the structure. However, in this paper, we took radiation forces, occurred by individual motions of floating bodies, into consideration. The calculated results show good agreement with the experimental and calculated results by Yago.

#### 1. 서 론

초대형 부유식 구조물은 길이와 폭에 비하여 높이가 매우 작은 기하학적 특성으로 인하여 파랑 중의 탄성응답이 현저하게 나타난다. 이러한 파랑 중 초대형 부유식 구조물의 탄성거동을 해석하기 위한 연구는 상당히 진행되어 국내에서도 이미 수심, 파주기, 파향 및 강성의 변화에 따른 응력특성(경조현 등, 2004; 홍사영 등, 2003) 및 시간영역해석을 통한 항공기 이·착륙과 같은 문제(신현경 등, 2001; 이동환 등, 2001; 이호영 등, 2000)도 다루어지고 있다. 유탄성응답을 해석하기 위한 방법으로는 크게 구조물의 고유모드를 구하여 이들 모드를 중첩시켜 탄성응답을 해석하는 모드합성법과 구조물의 각 절점의 변위를 운동방정식에서 직접 구하는 이산화법이 있다. 초대형 부유식 구조물의 구조형식은 바이지식과 다수의 Column, Column-footing 및 Lowerhull에 의해 지지된 반잠수식의 구조형식으로 대별되고, Ma at al(1996)은 이들의 응답특성을 비교한 바도 있다. 하지만, 일본의 판서 신공항의 제2터미널의 구조형식

으로 바이지식이 채택됨에 따라 현재는 바이지식 초대형부유식 해양구조물의 연구가 대다수를 차지하고 있다. 이러한 바이지식과 같은 극히 단순한 형상의 초대형구조물은 탄성응답에 크게 기여하는 고유모드를 쉽게 알 수 있어 대다수의 연구가 모드합성법을 적용하여 해석되고 있다. 하지만, 실제 초대형 부유식 구조물의 이용목적과 제안 예를 살펴보면, 바이지식과 같은 극히 단순한 형상보다는 용도에 따라 활주로와 같이 부분적으로 긴 구조물이 첨가되거나 복잡한 형상이 요구되어 실제 일반화된 모드를 적용하기가 어렵게 된다. 또한, 쓰레기 소각장이나 발전소와 같은 구조물 상부의 건물 건물은 초대형구조물 위에 부분적인 질량집중을 가져오게 되므로 구조물 부분에 따라 강성의 변화를 요구하기 때문에 모드합성법의 적용에는 어려움이 있다. 홍사영 등(2003)은 초기 설계시 전체구조 강성을 결정하기 위해서는 직접해석법의 적용을 권장하기도 했다.

본 논문에서는 임의 형상에 적용이 용이하고, 부분적인 강성변화를 가지는 구조물의 탄성응답을 해석할 수 있는 직접법을 적용하였다. 초대형 부유식 구조물은 전조공법상 지상에서 다수의 단위 유닛들을 건조된 후, 해상에서 각각의 유닛들을 결합한다. 이를 고려하여 본 연구에서는 구조물을 다수의 외각요소(단위 유닛들)로 분할하고, 각 외각요소에 대한 유체력 및 파랑제력을 산정

교신저자 구자삼 : 부산광역시 남구 대연동 407-45번지

051-620-6480 jsgoo@pknu.ac.kr

하였다. 그리고, 전체 구조물에 대하여 각 외각요소의 중앙점을 절점으로 하여 이들 절점을 탄성 보요소로 연결하여 모델링하고 유한 요소법에 의해 정식화함으로써 유탄성 응답을 해석하였다. 특히, 초대형부유식 구조물의 탄성응답을 정도 좋게 평가하기 위하여 기존의 구조물 전체좌표계의 원점에 대한 각 외각요소들의 강제운동에 대한 방사문제를 풀 후, 각 대표절점에 대하여 좌표변환하는 방법(조효제 등, 1998) 대신에 각 외각요소의 대표절점에 대한 각각의 6자유도 운동을 직접 고려하여 방사문제를 해석하였다.

길이 9.75m × 폭 1.97m × 높이 0.545m인 모델에 대한 Yago and Endo(1996)의 실험치 및 구조물의 강제 운동에 의한 유체력을 고려한 경우(조효제 등, 1998)와의 비교·점토를 통하여 본 해석기법의 타당성을 확인하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 기본가정 및 좌표계

탄성응답 해석법에 의해 구조물의 동적 응답을 해석하기 위한 기본가정은 다음과 같다.

- (1) 유체는 비압축성, 비점성으로 하고, 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다.
- (2) 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.
- (3) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.
- (4) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다. 전체구조를 Fig. 1과 같이 요소로 분할하고, 각 요소는 그 역할에 따라 (1) 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소(Hull element)와 (2) 탄성체로서 외각요소의 절점을 연결하는 보요소(Beam element) 등 2종류로 분류한다.

### 2.2 운동방정식

외각요소에 작용하는 유체압력은 그 외각요소의 절점에서의 힘과 모멘트로 평가한다.

각 절점에서 평가한 힘과 모멘트는 변위, 속도, 가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조전체의 절점 변위벡터를  $\{n\}$  라 하고 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합해줌으로써 구조 전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$[-\omega^2([M_S] + [\mu]) - i\omega([C_S] + [v]) + ([K_S] + [K_P])] \{n\} = \{F^W\} \quad (1)$$

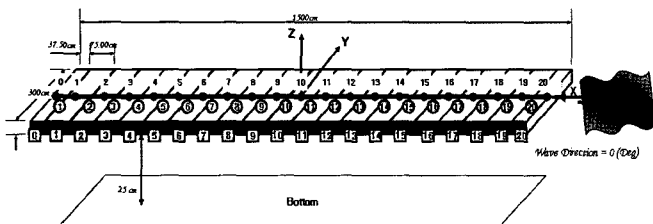


Fig. 1 Sketch of floating bodies and the beam elements for the upper structure

여기서,  $[M_S]$  : 전체 질량행렬

$[\mu]$  : 유체에 의한 전체 부가질량행렬

$[C_S]$  : 전체 구조감쇠행렬

$[v]$  : 전체 조파감쇠행렬

$[K_S]$  : 전체 강성행렬

$[K_P]$  : 정수압에 의한 전체 복원력행렬

$\{F^W\}$  : 파장제력 벡터

$\{n\}$  : 구조물 전체의 절점 변위 벡터

식 (1)의 연립방정식을 푸는 것에 의해 절점 변위 벡터  $\{n\}$  가 구해진다. 절점 변위 벡터가 구해지면 외각요소  $l$ 의 침수 표면상의 임의의 점  $(x', y', z')$ 에 있어서의 변동압력은 다음과 같이 구해진다.

$$p^l = \left[ i\rho\omega\phi'_l + i\rho\omega \left\{ \phi'_D + \sum_{k=1}^6 -i\omega n'_k \phi'_k \right\} - \rho g \{ n'_3 + (y' - y'_0) n'_4 - (x' - x'_0) n'_5 \} \right] e^{-i\omega t} \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ ,  $\rho$ 는 파주파수와 해수밀도이고,  $\phi'_l, \phi'_D, \phi'_k$ 은 각각 침수표면상의 임의의 점  $(x', y', z')$ 에서의 입사, 산란, 방사포텐셜이다.  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ 은 외각요소  $l$ 의 절점 좌표이고,  $n'_k$ 은 그 절점 변위이다.

전체 구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh감쇠를 이용하기로 한다.

$$[C_S] = a[M_S] + b[K_S] \quad (3)$$

여기서,  $a, b$ 는 비례상수이다.

### 2.2.1 부가질량행렬 및 조파감쇠행렬

총  $N$ 개의 외각요소로 구성된 구조물에 대하여 유체력을 구하기 위한 방사 경계치 문제는 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi_k = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} - k\phi_k = 0 \quad \text{on } S_F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (6a)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \text{grad} \phi_k = 0 \quad \text{on } S_B \quad (6b)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial \phi_k}{\partial R} - ik\phi_k \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (7)$$

위 식 (4)~(7)은 각각 유체내부  $\Omega$ 에서의 유체의 연속성을 나타내는 지배방정식, 자유표면  $S_F$ 에 대한 경계조건, 유한수심 및

무한수심의 경우에 대한 해라면  $S_B$ 에 있어서의 불투과조건을 나타내는 바닥경계조건, 그리고 무한 원방  $S_R$ 에 있어서의 방사조건을 나타내고 있다.

위의 경계치 문제를 풀기 위한 부체 침수표면  $S_H$ 에 있어서의 경계조건에 대하여는 우선 Fig. 1과 같이 초대형 부유식 구조물의 기준좌표계의 원점을 운동기준점으로 하여 구조물이 강제 운동을 한다고 하면 다음과 같이 물체표면 경계조건을 둘 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = n_k \quad \text{on} \quad S_H \quad (8)$$

식 (8)의  $n_k$ 는 각 축에 평행한 단위 속도 운동에 의한 부체표면에서의 운동 속도의 법선방향성분 ( $k=1\sim 3$ ) 및 각 축 둘레의 단위 각속도 운동에 의한 부체 표면에서의 운동 속도의 법선방향성분 ( $k=4\sim 6$ )으로, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_1 &= n_x, \quad n_2 = n_y, \quad n_3 = n_z \\ n_4 &= (y - y_0) n_z - (z - z_0) n_y \\ n_5 &= (z - z_0) n_x - (x - x_0) n_z \\ n_6 &= (x - x_0) n_y - (y - y_0) n_x \end{aligned} \quad (9)$$

구조물의 기준좌표계의 원점을 운동기준점으로 한 6자유도의 강제운동의 방사포텐셜  $\phi_k$ 가 구해지면 외각요소  $l$ 의 절점  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ 을 운동기준점으로 한 6자유도의 방사포텐셜  $\phi'_k$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi'_1 &= \phi_1, \quad \phi'_2 = \phi_2, \quad \phi'_3 = \phi_3 \\ \phi'_4 &= \phi_4 - y'_0 \phi_3 + z'_0 \phi_2 \\ \phi'_5 &= \phi_5 + x'_0 \phi_3 - z'_0 \phi_1 \\ \phi'_6 &= \phi_6 - x'_0 \phi_2 + y'_0 \phi_1 \quad (l = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (10)$$

다음으로, 각 외각요소의 개별거동에 의한 구조물의 탄성거동을 좀 더 엄밀히 평가하기 위하여 구조물을 구성하는 각 외각요소들이 해당 외각요소의 대표 절점  $(x'_0, y'_0, z'_0)$  ( $l = 1, 2, \dots, N$ )에 대하여 각각의 6자유도 운동을 하는 것으로 고려하면 부체 침수표면  $S_H$ 에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = n'_k \quad (l = 1, 2, \dots, N) \quad \text{on} \quad S_H \quad (11)$$

특히 식 (11)의  $n'_k$ 는 일반화 방향여현으로, 다음과 같다.

$$n'_1 = n_x, \quad n'_2 = n_y, \quad n'_3 = n_z$$

$$\begin{aligned} n'_4 &= (y' - y'_0) n_z - (z' - z'_0) n_y \\ n'_5 &= (z' - z'_0) n_x - (x' - x'_0) n_z \\ n'_6 &= (x' - x'_0) n_y - (y' - y'_0) n_x \end{aligned} \quad (12)$$

위의 경계치문제(방사문제)를 풀어서  $\phi_k$ 가 구해지면, 외각요소  $l$ 의 방사포텐셜  $\phi'_k$ 은 다음과 같다.

$$\phi'_k = \phi_k \quad (13)$$

외각요소  $l$ 에 작용하는 동유체력은 속도에 비례하는 힘과 가속도에 비례하는 힘으로 분리할 수 있다. 속도에 비례하는 힘을  $\{F_N^{Rl}\}$ 라 하고, 가속도에 비례하는 힘을  $\{F_A^{Rl}\}$ 라 하면, 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_N^{Rl}\} = -[v_{jk}^{l'}] \{\ddot{n}^{l'}\}, \quad (j, k = 1 \sim 6) \quad (14)$$

$$\{F_A^{Rl}\} = -[\mu_{jk}^{l'}] \{\ddot{n}^{l'}\}, \quad (j, k = 1 \sim 6) \quad (15)$$

$$\mu_{jk}^{l'} = -\rho Re \left[ \iint_{S_H} n'_j \phi'_k ds \right] \quad (16)$$

$$v_{jk}^{l'} = -\omega \rho Im \left[ \iint_{S_H} n'_j \phi'_k ds \right] \quad (17)$$

이고,  $\mu_{jk}^{l'}$ 과  $v_{jk}^{l'}$ 은 각각 외각요소  $l$ 에 대하여  $k$ 방향의 운동에 의한  $j$ 방향에의 부가질량 및 감쇠계수이고,  $S_H^{l'}$ 는 외각요소  $l$ 의 침수표면적이다.

## 2.2.2 복원력행렬

임의의 외각요소  $l$ 의 절점  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ 에서의 정적 유체압력과 중력에 기인하는 복원력에 대한 외각요소  $l$ 의 복원력행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K_p^l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서,

$$K_{33} = \rho g S_0^l, \quad K_{34} = \rho g \int \int_{S_0^l} (y' - y'_0) dA$$

$$K_{35} = -\rho g \int \int_{S_0^l} (x' - x'_0) dA$$

$$K_{44} = \rho g \int \int_{S_0^l} (y' - y'_0)^2 dA + \rho g V_0^l (z'_b - z'_0) - m^l g (z'_g - z'_0)$$

$$K_{45} = -\rho g \int \int_{S_0'} (x^i - x_0^i)(y^i - y_0^i) dA$$

$$K_{46} = -\rho g V_0'(x_b^i - x_0^i) + m^i g(x_g^i - x_0^i)$$

$$K_{43} = K_{34}, K_{53} = K_{35}, K_{54} = K_{45}$$

$$K_{55} = \rho g \int \int_{S_0'} (x^i - x_0^i)^2 dA + \rho g V_0'(z_b^i - z_0^i) - m^i g(z_g^i - z_0^i)$$

$$K_{56} = -\rho g V_0'(y_b^i - y_0^i) + m^i g(y_g^i - y_0^i)$$

여기서,  $m^i$  및  $V_0'$ 은 외각요소  $l$ 의 질량 및 배수용적,  $(x_g^i, y_g^i, z_g^i)$ 은 외각요소의  $l$ 의 무게중심,  $(x_b^i, y_b^i, z_b^i)$ 은 외각요소  $l$ 의 부심,  $S_0' = \int \int_{S_0'} dA$ 는 외각요소  $l$ 의 수선면적이다.

2.2.3 강성행렬 및 질량행렬

전단변형 및 회전관성을 고려한 보요소의 강성행렬 및 질량행렬은 TLP등의 해양구조물에 적용되어온 기존의 연구(구자삼 등, 1998)를 이용하고, 전체구조물에 대한 값으로 좌표 변환하여 적용하였다.

2.2.4 파강제력 벡터

외각요소  $l$ 의 입사파 속도포텐셜  $\phi_l^i$ 은 다음과 같다.

$$\phi_l^i = \phi_l \tag{19}$$

외각요소  $l$ 에 작용하는 기준좌표계에 대한 입사파에 의한 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^i\} = -i\rho\omega \int \int_{S_{ij}} \phi_l^i n_j^i ds, (j=1\sim6) \tag{20}$$

산란포텐셜  $\phi_D$ 는 경계치 문제(산란 문제)의 해로서 구해진다. 산란포텐셜  $\phi_D$ 가 구해지면 외각요소  $l$ 의 산란포텐셜  $\phi_D^i$ 는 다음과 같다.

$$\phi_D^i = \phi_D \tag{21}$$

외각요소  $l$ 에 작용하는 기준좌표계에 대한 산란파에 의한 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^{D^i}\} = \left\{ -i\rho\omega \int \int_{S_{ij}} n_j^i \phi_D^i ds \right\}, (j=1\sim6) \tag{22}$$

그러므로, 외각요소  $l$ 의 절점에 작용하는 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^{W^i}\} = \{F_j^{I^i}\} + \{F_j^{D^i}\}, (j=1\sim6) \tag{23}$$

3. 수치계산 결과 및 고찰

초대형 부유식 구조물의 외각요소들이 각각의 운동기준점에 대하여 거동하는 경우의 동유체력의 효과를 고려한 본 탄성응답 해석법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 1과 같은 초대형 부유식 구조물에 대한 Yago 등의 실험치 및 친환수 이론을 이용한 계산치와 비교·검토하였다. Yago의 실험 모델에 대한 주요목은 Table 1과 같다. 계산모델은 Fig. 1과 같이 전체모델을 21개(21×1)의 외각요소로 분할하였다. 파입사각은 Yago의 실험치와 비교하기 위하여 180°로 하였다.

전체 구조는 Fig. 1과 같이 직선보요소들로 근사하였고, 모델의 강성의 불균일성을 무시하여 종탄성계수는  $1.716860 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>으로 전 구조물에 대해 균일한 것으로 하고, 보요소의 비틀림 계수는 98.7450408cm<sup>4</sup>로 하였다. 포외송비는 0.345로 하고, 보요소의 재료의 밀도는  $5.264047 \times 10^{-6}$  kgf·sec<sup>2</sup>/cm<sup>4</sup>으로 하였고, 구조감쇠는 Rayleigh감쇠로 전체질량행렬에 비례하는 구조감쇠의 비례상수  $a$ 는 0.0으로 하였고, 전체강성행렬에 비례하는 구조감쇠의 비례상수  $b$ 는 0.01로 하였다. Fig. 1에서 흑점은 각 외각요소의 유체력 및 파강제력이 취부되는 절점을 나타내고 굵은 실선은 보요소를 나타낸다. 절점번호 0~20에서 구조물의 수직방향(Heave)의 절점 변위 응답을 출력하였고, 요소부재번호 ①~⑳에서 구조물의 수직굽힘모멘트의 응답을 출력하였다. 절점번호 3, 17에서는 돌핀계류를 시켜서  $y$  방향의 병진운동만을 구속시키고, 절점번호 20에서는  $x$  방향의 병진운동만을 구속하였다. 또한 좌표계 XYZ는 전체좌표계로서 지지부체의 위치, 상부구조의 절점좌표 및 지지부체의 취부절점 이외의 절점의 경계조건, 절점변위 및 절점반력은 이 좌표계를 이용한다. 좌표계  $xyz$ 는 각 외각요소들의 6자유도운동을 고려하여 유체력을 구하는 경우의 국소좌표계이다.

3.1 수직변위 진폭응답

그림 상에 나타나는 단점선은 각 외각요소들이 구조물의 기준좌표계의 원점을 운동기준점으로 하여 6자유도의 강제운동을 하는 경우의 방사포텐셜을 구한 후, 각 외각요소들의 해당 대표절점을 운동기준점으로 한 각각의 6자유도 운동에 의한 각 외각요소들의 방사포텐셜로 변환하여 유체력

Table 1 Principal particulars of the Yago model

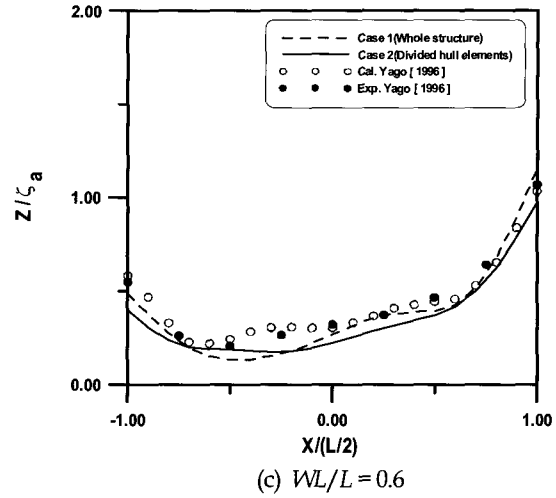
	VL10 [Test Model]	Prototype
Scale ratio	1/30.77	1/1
Length, $L$	9.75m	300.0m
Breadth, $B$	1.90m	60.0m
Depth, $D$	54.5mm(1.68m)	2.0m
Draft, $d$	16.6mm	0.5m
Stiffness, $EI_{Longi.}$ (kg·m <sup>2</sup> )	$1.788 \times 10^3(4.93 \times 10^{10})$	$4.87 \times 10^{10}$
Water depth	1.9m(58.5m)	8m

을 산정한 경우(Case 1)이고, 실선은 변환 과정 없이 외각요소들이 각각의 대표절점에 대하여 각각의 6자유도 운동을 하는 경우에 대한 방사문제를 해석하여 동유체력을 고려하여 수치계산한 결과(Case 2)를 나타낸다. 원표(○)는 Yago의 계산결과를 나타내고, 흑점(●)은 Yago에 의한 실험결과를 나타낸다.

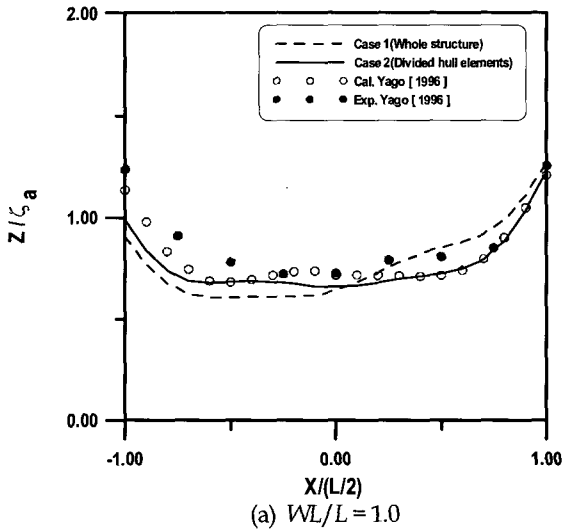
Fig. 2(a)~Fig. 2(e)는  $WL/L=1.0$  ( $WL$ 은 무한수심에서의 입사파의 파장)에서 0.2까지 0.2씩 감소시킨 경우에 대한 수직변위 응답(cm/cm)으로 본 계산방법에 의한 결과치와 Yago의 계산치 및 실험치와 비교하고 있다. 가로축은 모델 중앙부를 원점으로 하여 길이방향을 나타내었고, 세로축은 단위진폭 당 수직변위를 나타내고 있다.

Fig. 2(a)~Fig. 2(e)에서 Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우가 Case 1의 방사 유체력만을 고려한 경우보다 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있다. 이것은 초대형 부유식 구조물은 기하학적 특성상 탄성거동에 의한 영향이 상당히 크기 때문이다.

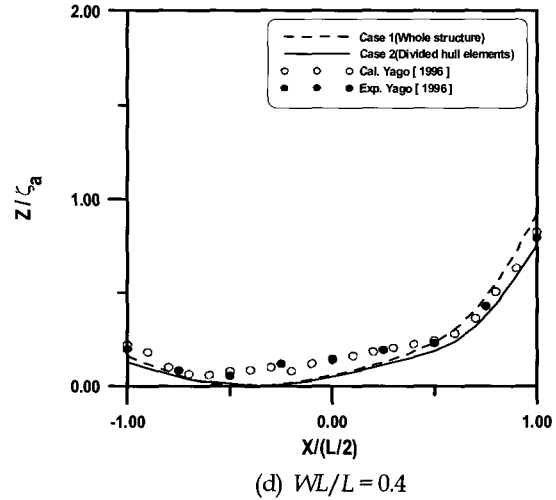
W.D. = 180 deg.,  $WL/L=0.6$



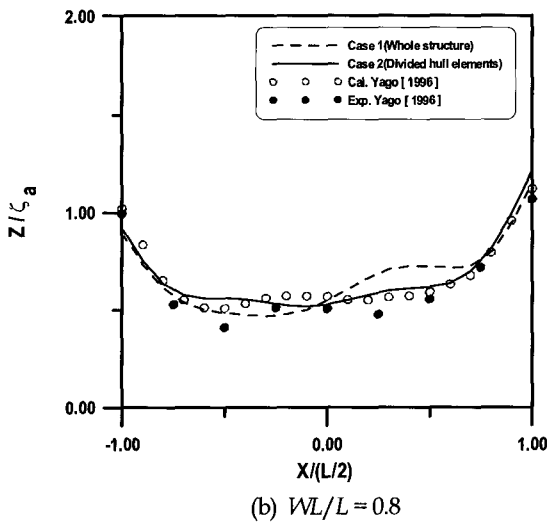
W.D. = 180 deg.,  $WL/L=1.0$



W.D. = 180 deg.,  $WL/L=0.4$



W.D. = 180 deg.,  $WL/L=0.8$



W.D. = 180 deg.,  $WL/L=0.2$

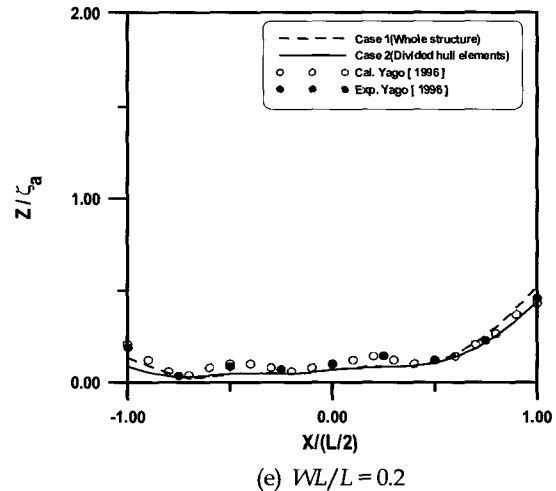


Fig. 2 Longitudinal distributions of vertical displacement amplitude at  $\beta=180^\circ$

Fig. 2(a)~Fig. 2(c)의 구조물 전장의 반 이상이 되는 장파장(저주파수)영역에서는 Case 1의 방사 유체력을 고려한 경우에는 구조물 내의 응답, 특히  $X(L/2)=\pm 0.5$  되는 지점에서 파상축은 다소 높게, 파하축은 다소 낮게 응답이 나타나고 있으나 Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우에는 구조물 내부의 응답도 잘 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 파장이 긴 경우 구조물의 응답은 탄성 응답이 지배적이게 되고, 이에 의해 내부 응답이 큰 영향을 받는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 2(d)~Fig. 2(e)의 단파장(고주파수)영역에서는 Case 1의 방사 유체력만을 고려한 경우가 Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우보다 파상축이 다소 높게 평가되는 것을 제외하고는 거의 유사한 응답을 나타내고 있다. 이는 파장이 짧아질수록 탄성 거동에 의한 유체력의 영향이 점차 줄어들기 때문이다.

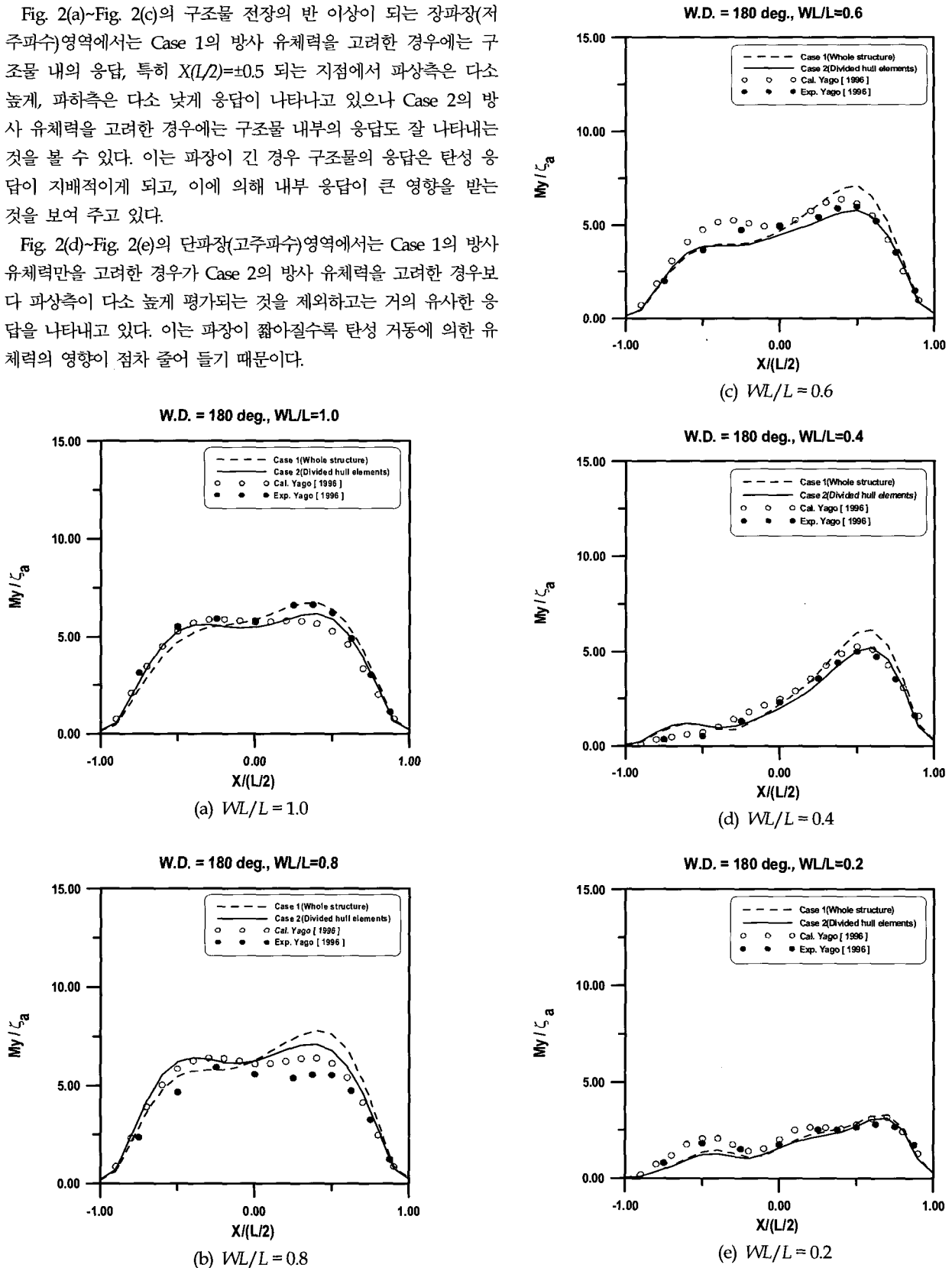


Fig. 3 Longitudinal distributions of vertical bending moment amplitude at  $\beta=180^\circ$

### 3.2 수직굽힘 모멘트 진폭응답

Fig 3(a)~Fig 3(e)의 가로축은 모델 중앙부를 원점으로 하여 길이 방향을 나타내었고, 세로축은 수직굽힘모멘트진폭응답(kgf·cm/cm)을 나타내고 있다.

수직 굽힘 모멘트 진폭 응답에 있어서도 수직 변위 진폭 응답과 마찬가지로 Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우가 Case 1의 방사 유체력만을 고려한 경우보다 전체 구조물의 탄성거동을 잘 나타내며 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig 3(a)~Fig 3(c)의 Yago의 실험치를 보면 저주파수 영역에서는 모델 중심의 전후 1/4부근에서 최대응답이 나타나는 것을 볼 수 있다. Case 1의 방사 유체력만을 고려한 경우에는 모델 중심의 전 1/4부근에서만 최대응답이 나타나고 이후 응답이 감소해 가지만, Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우에는 모델 중심의 전후 1/4부근에서 모두 최대응답이 나타나는 탄성응답을 잘 나타내고 있다.

Fig 3(d)~Fig 3(e)에서 파상축의 1/2부근에서 최대응답이 나타나고, 파하측 및 중앙부의 응답은 저주파수의 경우와는 달리 점진적으로 감소되어 지는 것을 볼 수 있다. Case 1의 방사 유체력만을 고려한 경우와 Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우 모두 이러한 응답을 잘 나타내고 있다. 하지만, Case 1의 방사 유체력을 고려한 경우에는 최대응답의 값이 Yago의 실험치보다 다소 높게 평가되어지지만, Case 2의 방사 유체력을 고려한 경우에는 Yago의 실험치와 아주 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig 3(c)의  $WL/L=0.6$ 에서 Fig 4(d)의  $WL/L=0.4$ 로 파장의 길이가 짧아질수록 응답의 최대치의 차이는 줄어들음을 볼 수 있다.

특히 Fig 3(e)의  $WL/L=0.2$ 에 해당하는 고주파수의 경우에는 구조물 내의 응답이 주로 강체 거동에 기인하기 때문에 탄성 거동의 방사 유체력에 의한 영향이 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서 취급한 계산모델 및 계산조건하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 파랑 중 초대형 부유식 구조물의 탄성응답을 실용적으로 정도 좋게 추정할 수 있는 탄성응답 해석법을 개발하였다.

(2) Yago의 바이저식 부유구조물에 대한 실험 및 계산치와 본 탄성응답 해석법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.

(3) 구조물을 구성하는 각 외각요소들의 개별적인 운동에 의한 유체력을 평가할 경우, 파랑 중 초대형 부유식 구조물의 탄성응답을 정도 좋게 표현할 수 있다.

(4) 본 연구에서 개발된 프로그램은 고유모드를 구하기 힘든 다양한 형상이나 강성의 분포가 부분적으로 달라지는 실제 초

대형 부유식 구조물의 탄성응답 해석에 경제적이고 합리적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

(5) 본 탄성응답 해석법은 파랑 중의 초대형 부유식 구조물의 정확한 탄성응답을 예측할 수 있어 구조설계시 피로강도설계의 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

경조현, 김병완, 조석규, 홍사영 (2004). "해저 지형을 고려한 초대형 부유체의 유탄성 거동해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp 783-792.

구자삼, 조효제, 김병현, 이창호 (1998). "바이저식 초대형 부유구조물의 유탄성응답해석", 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 43-56.

신현경, 이호영, 임춘규, 강점문, 윤명철 (2001). "규칙파중 항공기 이·착륙시 초대형 부유식 해양구조물의 천이 응답해석", 한국해양공학회지, 제15권, 제1호, pp 26-30.

이동환, 조경남, 최윤락, 홍사영, 최항순 (2001). "모드중첩법을 이용한 정수중의 매트형 거대부유구조물의 동하중에 대한 시간영역 유탄성 해석", 대한조선학회논문집, 제38권, 제4호, pp 39-47.

이호영, 박종환, 곽영기 (2001). "선박의 충돌로 인한 해양구조물의 거동 해석", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 115-119.

조효제, 구자삼, 이창호, 김철현, 박광동 (1998). "저속 비대선의 탄성응답해석", 삼성중공업 보고서.

홍사영, 조석규, 김진하, 박성환 (2003). "유탄성 해석을 통한 초대형 부유식 구조물의 구조특성 검토", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp 92-98.

Yago, K and Endo, H. (1996). "On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft(Tank Test with Large Scale Model)", Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol 180, pp 341-352.

Ma, N., Hirayama, T. and Sato, N. (1996). "Comparative Study of Hydroelastic Responses of Semisubmersible Type and Pontoon Type Very Large Floating Structure in Waves", Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol 180, pp 353-363.

Toki, N. (1979). "A Study on the Behavior of Huge Floating Structure in Regular waves", Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol 146, pp 185-194.

2006년 9월 14일 원고 접수

2006년 12월 5일 최종 수정본 채택